



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH VIBRAČNÍHO STOLU

DESIGN OF VIBRATION TABLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michael Tuček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Michael Tuček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Jan Pavlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh vibračního stolu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení vibračního stolu. Vibrační stůl bude sloužit pro usnadnění plnění a zhutňování směsi do forem. Rozměrové a výkonnostní charakteristiky budou součástí návrhu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Důkladná analýza problematiky.
- 2) Návrh variant řešení a jejich technicko–ekonomické zhodnocení.
- 3) Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.
- 4) Výpočtová zpráva.
- 5) Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. Brno: Naladatelství VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

POLÁK, Jaromír. Dopravní a manipulační zařízení II. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0493-X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh vibračního stolu, který slouží ke zhutňování betonových směsí ve formách. Nejprve se zabývá řešerší ohledně složení betonu, následně jsou vyčteny způsoby jeho zhutňování pomocí vibrací a navrhnuty dvě varianty budiče, kterým bude opatřen stůl. Výhodnější varianta je dále rozpracována a jsou postupně navrženy prvky celé konstrukce včetně jejich pevnostních výpočtů.

ABSTRACT

The main aim of this bachelor thesis is to create a construction plan of vibrating table used for compaction of concrete in molds. First it describes compaction of concrete, after there are listed methods of its consolidation using vibrations. Two variants of vibration drive are created and preferable one is further developed. Individual elements of the structure are designed including their strength analysis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrační stůl, zhutňování betonu, vibrace, vibrační motor, pneumatický pohon

KEYWORDS

Vibrating table, concrete consolidation, vibration, vibrating motor, pneumatic drive

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TUČEK, M. *Návrh vibračního stolu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu za cenné rady a odborné vedení této bakalářské práce a kamarádům za důležité připomínky. Zvláštní poděkování patří моým rodičům za podporu po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jan Pavlík, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Tuček Michael

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	ZÁKLADNÍ SLOŽKY BETONU	13
3	ZHUTŇOVÁNÍ BETONU.....	15
4	TYPY VIBRÁTORŮ	17
4.1	Vnitřní vibrátory	17
4.2	Povrchové vibrátory.....	18
4.3	Vnější vibrátory	19
4.3.1	Kuličkový vibromotor	20
4.3.2	Turbínový vibromotor	20
4.3.3	Pístový vibromotor	21
5	KONSTRUKCE VIBRAČNÍHO STOLU.....	23
5.1	Způsob buzení vibrací.....	24
5.1.1	Nevyvážený hřídel	24
5.1.2	Vibrační motor.....	25
5.2	Volba vibračního motoru	26
5.3	Návrh pracovní desky	27
5.3.1	Pevnostní analýza	29
5.4	Volba pružného uložení	34
5.5	Kontrola svarových spojů	37
5.5.1	Držák vibračního motoru.....	39
5.6	Návrh nosného rámu	40
6	ZÁVĚR.....	41
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
8	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	47
8.1	Seznam tabulek	47
8.2	Seznam obrázků.....	47
9	SEZNAM PŘÍLOH	49
	PŘÍLOHY.....	49

1 ÚVOD

V moderní architektuře slouží beton ke ztvárnění mnoha dekorativních prvků. Lze tak vytvořit objekty o jakémkoliv tvaru a barvě. V mnoha domácnostech se pak vyskytují netradiční plochy z podhledového betonu vyžadující téměř nulovou údržbu (Obr. 1a). Dalším hojným využitím jsou zámkové dlažby skládané z prakticky jakéhokoliv tvaru kostky, které zkrášlují jak travnaté, tak pevné plochy (Obr. 1b). A právě tyto kostky vyžadují před zatuhnutím pro celkovou kvalitu výsledného produktu důležitou úpravu.

Hlavním cílem projektu je vytvořit vibrační stůl sloužící ke zhutňování betonové směsi odlévané do forem, které jsou na stůl ukládány volně. Měl by splňovat kritéria nosnosti 50 kilogramů a rozměrových charakteristik pracovní plochy 700x350 mm.

Práce je rozdělena na 4 hlavní kapitoly, které jsou rozepsány po této úvodní části. Nejprve je shrnuto základní složení betonu, což navazuje na problematiku řešenou právě hutněním. Následně je představena jedna z nejdůležitějších používaných praktik – vibrace. Další kapitola tedy zahrnuje výčet používaných zařízení v praxi s konečným zaměřením na vibrační stoly. V poslední kapitole se nachází kompletní návrh vibračního stolu kompletně s pohonem na stlačený vzduch. Jsou provedeny jak předběžné návrhy, tak následné výpočty a pevnostní analýza v simulačním programu. Nakonec je provedeno závěrečné zhodnocení práce po technické a ekonomické stránce.



Obr. 1) a) Interiér s betonovými prvky [28]; b) exteriér s využitím betonu u vegetační plochy [29]

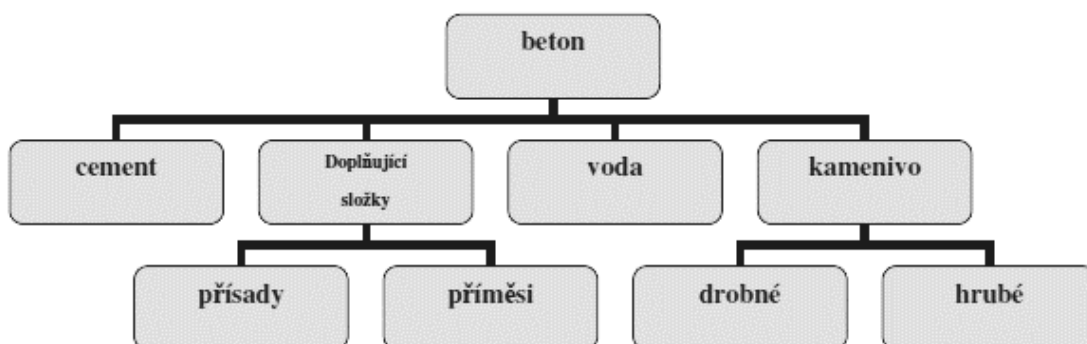
2 ZÁKLADNÍ SLOŽKY BETONU

Beton je zkomponován hned z několika složek (Obr. 2). Nejčetnější složkou je kamenivo, které plní funkci plniva a zaujímá někdy až 80% objemu betonové směsi. Vytváří především stabilní skelet s minimálními skulinami, což je zapříčiněno vhodně zvoleným poměrem velikosti zrn kameniva a následně jejich vzájemným zapřením. Požadavky na kameniva jsou specifikovány v evropských normách:

ČSN EN 12620 – Kamenivo do betonu

ČSN EN 13055 – Pórovité kamenivo

ČSN EN 13139 – Kamenivo pro malty



Obr. 2) Schéma základních složek betonu [1]

Kvalita betonu může být ovlivněna špatným kamenivem s obsahem škodlivých látek. Především se jedná o látky, kterými je kamenivo obohaeno svým původem. Kamenivo nemusí být jen anorganického původu, ale jsou využívány i uměle vyráběné granule z odpadního materiálu. K tomuto účelu slouží především rozdrčené sklo, cihly či zbytková struska.

Další významnou složkou betonu je cement, který je definován evropskou normou ČSN P ENV 197-1. Křemičitanový cement je definován jako anorganické pojivo, které vytváří po smíšení s vodou postupně tuhnoucí kaši. Výhodou je, že kaše tuhne a tvrdne jak na vzduchu, tak i pod vodní hladinou a nadále si zachovává svou stálost. [1] Jedná se o jemně mletý jednosložkový materiál, dnes označovaný také jako portlandský cement.

Po smíšení s vodou dochází k chemické reakci zvané hydratace, která je velmi komplexním procesem obsahující jak chemické, tak fyzikální jevy.

Ke zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu a snížením intenzity vibrací při zhutňování jsou v moderní technologii hojně používány plastifikátory. [2] Snižují také potřebné množství použité vody do směsi, čímž je redukován vodní součinitel a to má za následek zlepšení mechanických vlastností betonu (především pevnost a trvanlivost) a také možnost rozmanitějšího tvarování čerstvé směsi.

3 ZHUTŇOVÁNÍ BETONU

Prvotně byly používány betonové směsi velmi suché, což mělo za následek vysokou pevnost výrobků, avšak bylo zapotřebí mnoho úsilí při operování se směsí. Později se, především kvůli snadnějšímu odlévání do forem a transportu směsi, začala přidávat více voda. Beton už ale nebyl tak silný a často docházelo k tvorbě prasklin a drolení na povrchu. Různými experimenty byl sestaven tzv. poměr voda-cement, přičemž bylo zjištěno, že kvalita betonu rapidně klesá s přibývajícím vodou a obecně platí, že ke správné hydrataci potřebuje ve směsi cement asi 40% vody. [3]

Začaly se tedy zkoušet různé metody, jak beton zlepšit, důležitá je především konsolidace. Jedná se o proces, kde dochází k redukci vzduchových bublin uvnitř směsi, polapených především při odlévání směsi do formy. Jednou z nejrozšířenějších metod, jak dosáhnout konsolidace, je využití vibrací. Čerstvá betonová směs je ukládána do forem a následně je podstoupena vibracím buďto externě nebo interně, které jsou důkladněji popsány v kapitole 5. Jedná se o rychle za sebou působící rázy na částice betonu, přičemž dochází k jejich pohybu. Různé studie dokázaly, že to má na výslednou kvalitu betonu značný vliv. Minimalizuje se vnitřní tření mezi jednotlivými částicemi složek a působením gravitační síly se směs chová, jakoby byla v tekutém stavu a dokonale se rozmístí i na těžko přístupná místa. Výsledný beton je tak s nejmenším možným objemem bez vzduchových bublin, které byly vyplněny cementovou kaší. Tím také vzniká mnohem kvalitnější povrch.

Betonářský vibrátor v podstatě vyvolává rychlý oscilační pohyb, který je přenášen do směsi. Tento pohyb lze obecně popsat frekvencí (často také uváděno jako počet vibrací za minutu - vpm) a amplitudou. Vibromotory jsou používány prakticky pro všechny typy betonářských výrobků a jsou obvykle založeny na principu rotujícího závaží uloženého excentricky na hřídeli. Tento harmonický pohyb lze také charakterizovat sinusovou vlnou:

$$x = y \cdot \sin(\omega t) = y \cdot \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

kde y = amplituda [mm]

ω = úhlová rychlost [rad/s]

f = frekvence [Hz]

t = čas [s]

Z těchto hodnot lze i přepočítat zrychlení, jednotku intenzity vibrací. Zrychlení se obvykle uvádí v počtech g , gravitačního zrychlení. Tento parametr je důležitý především u externích vibrací, jelikož u vnitřních není možné změřit přesně amplitudu. [3]

$$a = \frac{F}{m_c} \quad (2)$$

kde F = odstředivá síla vibromotoru [N]

m_c = celková hmota, se kterou je vibrováno [kg]

Dalším důležitým parametrem, který zároveň slouží k výpočtu zrychlení, je velikost odstředivé síly vibrátoru. Jedná se o sílu, kterou vyvine právě rotující excentricky uložené závaží. Závisí na velikosti vibrátoru a jeho celkové hmotnosti.

Při zavedení vibrací dochází zprvu k neorganizovanému pohybu částic. Následně je sníženo jejich vzájemné tření, přičemž se směs stává téměř tekutou. Rozdíl vnitřního tření při vibrování je 0.15 psi (~ 1000 Pa), oproti tření v klidu 3 psi (~ 20000 Pa).

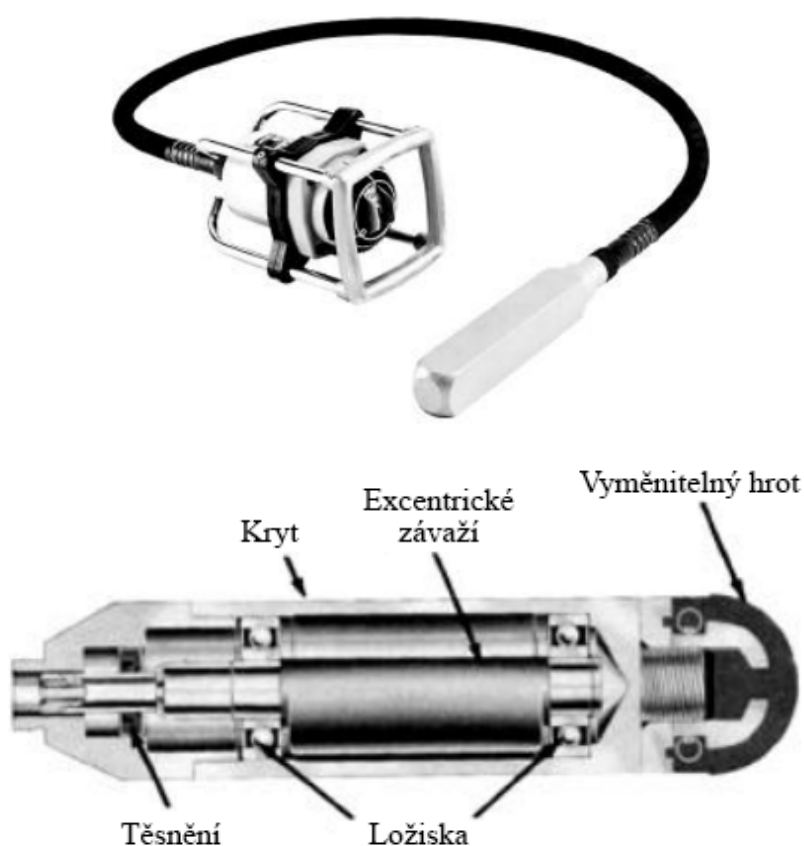
Již je tedy zřejmé, že jsou důležité tři parametry – odstředivá síla **F**, frekvence **f** a amplituda **y**. [5] Zpravidla platí, že vibrace o nízké frekvenci pohybují s většími složkami betonu, jako je kamenivo. Naopak vyšší vibrace způsobují pohyb malých složek, jako je cement nebo písek. Proto je nutné, aby byly vibrace vykonávány o správné frekvenci, aby nedocházelo k hromadění hrubšího kameniva na dně forem a akumulaci jemného materiálu u povrchu. Tento děj totiž následně vyvolává nechtěné pukání výrobku po zatuhnutí. Bylo zjištěno, že optimální frekvence pro dokonalé zhutnění betonu je okolo 12000 vpm (200 Hz). U nás používané betony mají zrnitost do 32 mm, zde je vhodné používat vibrátory s frekvencí v rozsahu 6000 – 12000 vpm (100 – 200 Hz) při malé amplitudě. [4]

4 TYPY VIBRÁTORŮ

Existuje hned několik možností, jak je možné provádět tyto oscilace, lze tedy stanovit interní, povrchové a externí vibrátory.

4.1 Vnitřní vibrátory

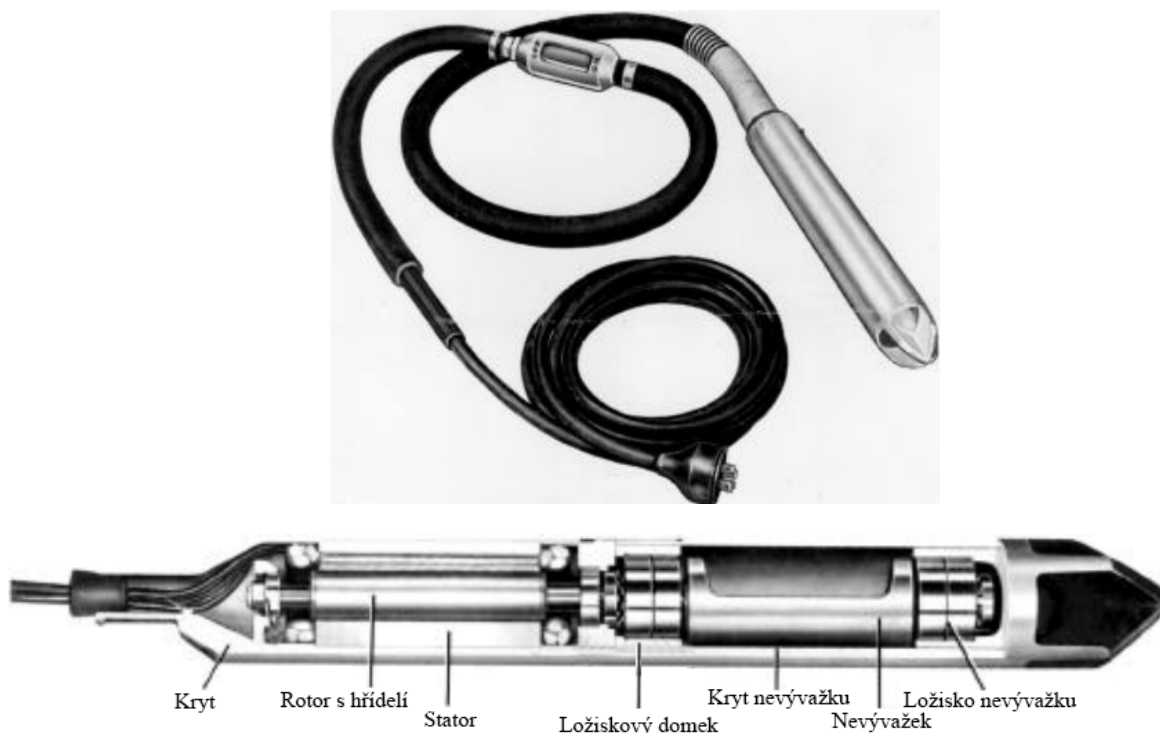
Interní vibrátor osciluje přímo se směsí jeho ponořením do naplněné formy. Je tak známý především jako „ponorný vibrátor“ (Obr. 3a, b). Nejrozšířenější konstrukce sestává z ohebné hřídele, na kterou je připevněna vibrační hlavice. Důležitým faktorem je zde tzv. akční rádius, parametr, který definuje, do jaké míry od hlavice mají vibrace vliv, obvykle bývá rozměrově desetinásobkem průměru vibrační hlavice. [6]



Obr. 3) a) Ponorný vibrátor s ohebnou hřídelí (nahore); b) průřez vibrační hlavou (dole) [6]

Poháněn je nejčastěji elektromotorem, může být i s pneumatickým či benzínovým motorem. Obecně pracuje s frekvencí 200-280 Hz, avšak tyto hodnoty se uvádí pro běh bez zátěže, po ponoření do směsi klesá až na jednu pětinu, podle typu kameniva. [4] Výhodou je relativně nízká pořizovací cena s širokou možností využití, absence chladiče, jelikož chlazení probíhá samotnou betonovou směsí. Na druhou stranu, ohebná hřídel je velmi namáhaná a vyznačuje se nízkou životností, navíc jsou vibrace přenášeny i do rukou, což znepráhňuje práci.

Na trhu také existují ponorné vibrátory s motorem přímo v hlavě (Obr. 4a, b). Z hlavy pak vychází pouze kabel do elektrické sítě, tudíž zde nejsou žádné další prvky, které je nutné během provozu držet v ruce.



Obr. 4) a) Ponorný elektrický vibrátor s motorem v hlavě (nahore); b) průřez hlavou (dole) [6]

4.2 Povrchové vibrátory

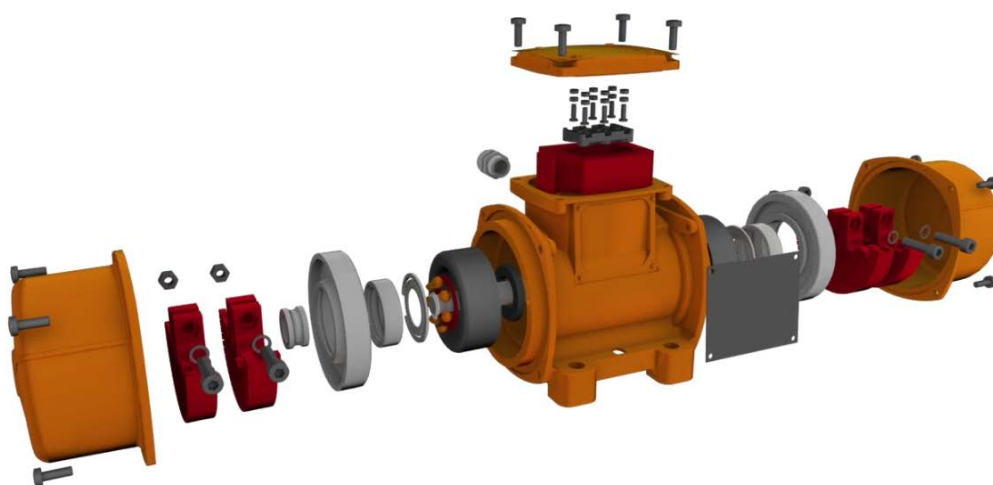
Konstrukčně jsou složeny z lišty, na kterou je připevněn vibromotor. Dělí se na dokončovací (Obr. 5a), dvojité a příhradové lišty (Obr. 5b). Dokončovací lišty obsahují stavitelnou rukojeť a slouží především k rychlému a snadnému uhlazení betonového povrchu do roviny. Dvojitými a příhradovými lištami lze navíc i betonovou směs zhutňovat, avšak pro důkladnou konsolidaci se doporučuje s lištami používat zároveň i ponorné vibrátory. [4] Je potřeba, aby byla lišta po celou dobu práce v kontaktu s betonovým povrchem a neodskakovala od něj.



Obr. 5) a) Dokončovací vibrační lišta Atlas Copco BV 20 E (vlevo) [8]; b) příhradová lišta Atlas Copco BT 90 (vpravo) [9]

4.3 Vnější vibrátory

Též nazývané „příložné“ vibrují s celou formou z vnějšku, přes kterou jsou vibrace přenášeny do směsi. Poháněny jsou elektromotorem, pneumatikou či hydraulikou. Elektricky poháněné vibromotory (Obr. 6) fungují na principu excentricky uložené hmoty na každém konci rotující hřídele, připojené k jednofázovému či třífázovému asynchronnímu elektromotoru. Nevývahy mohou být nastavitelné, čímž je dosažena změna odstředivé síly a tím i zrychlení. Nejčastěji dosahované frekvence jsou 3000 vmp (50 Hz) či 3600 vpm (60 Hz), dle druhu sítě, do které jsou zapojeny (230/400 V). Tyto motory nemají dostatečnou frekvenci ke zhutňování betonu a jsou především využívány pro dopravu sypkých materiálů v průmyslu. S použitím frekvenčního měniče s napětím 42 V je možné generovat vibrace až o frekvenci 12000 vpm (200 Hz) a tím se stávají využitelné i při zhutňování.

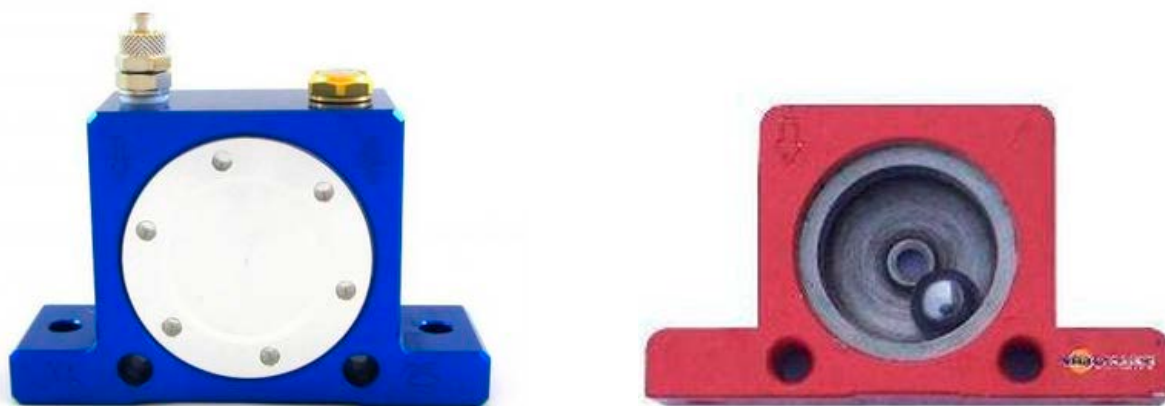


Obr. 6) Nízkofrekvenční elektrický vibromotor (nahore) [10]

Hydraulicky a pneumaticky poháněné vibromotory se vyznačují především dlouhou životností a téměř bezúdržbovým provozem, není třeba žádného mazání. Pohonem je zde stlačený vzduch či kapalina přiváděný do vibrátoru prostřednictvím hadice. Zároveň je velmi nízká i hladina hluku při běhu a velká výhoda spočívá v možnosti volby frekvence a odstředivé síly ve velmi širokém rozsahu různým nastavováním tlaku vzduchu či kapaliny. Mohou být rozděleny do několika kategorií.

4.3.1 Kuličkový vibromotor

Princip spočívá v rotaci ocelové kuličky poháněné stlačeným vzduchem ve zpevněné oběžné dráze, což následně vyvolává vibrace o vysoké frekvenci (Obr. 7). Výhodné jsou hlavně v kompaktnosti, okamžitém chodu bez rozběhu, široké škále modelů, z nichž většina dosahuje velmi vysokých frekvencí. Nevýhodou je poměrně nízká účinnost za cenu velkého odběru stlačeného vzduchu. Nejčastěji se využívají při manipulaci s materiály menších rozměrů, jako jsou šroubky a matice, a v secích zařízeních. [12]



Obr. 7) Kuličkový vibromotor od firmy VibraFrance - VKS Series [11]

Tab 1) Vybrané kuličkové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar

typ	Vibrace [min ⁻¹]	Odstředivá síla [N]	Spotřeba vzduchu [l/min]	Hmotnost [kg]
Webac UCV 25	12500	2120	550	1,30
RTI K220	15500	2160	175	0,55

4.3.2 Turbínový vibromotor

Jak už je zřejmé z názvu, jsou založeny na rotování turbínového kola s nevývažky vlivem stlačeného vzduchu (Obr 8a, b). Výhodou je nízká hlučnost, velice malá spotřeba vzduchu a vysoká účinnost. Ačkoliv je konstrukce vibrátorů podobná kuličkovým, tento

obsahuje navíc ložiska pro uchycení turbínového kola, tudíž jsou omezovány jejich životností. Tento pneumatický vibromotor však kombinuje relativně vysoký počet vibrací za minutu o velké odstředivé síle již za nízkého tlaku, tudíž se hojně využívá jako pohon vibračních dopravníků a vibračních stolů. [12]



Obr. 8) Turbínové vibromotory – a) od italské firmy RTI - typ T9 (vlevo) [12]; b) od firmy Webac Vibro s.r.o. (vpravo) [13]

Tab 2) Vybrané turbínové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar

typ	Vibrace [min ⁻¹]	Odstředivá síla [N]	Spotřeba vzduchu [l/min]	Hmotnost [kg]
Webac VT 17	8500	1960	235	0,78
RTI T24	8500	2470	225	1,96

4.3.3 Pístový vibromotor

Skládají se z pístu, který pracuje proti vzduchovému polštáři a vytváří kmitání. Jsou konstruovány k vyvinutí dokonale usměrněného lineárního kmitání, lze přidávat různá závaží na píst, čímž jsou upravovány amplitudy vibrací (Obr. 9a, b). Samozřejmě, stejně jako ostatní pneumatické vibromotory, lze upravit frekvenci tlakem dodávaného vzduchu. Nevyžadují žádnou údržbu, lze je používat v nebezpečných oblastech s rizikem výbuchu, vyznačují se perfektní start/stop charakteristikou. Používají se především k vyprazdňování zásobníků a zhutňování sypkých materiálů. [13]



Obr. 9) Pístové vibromotory – a) od firmy Webac (vlevo) [13]; b) od firmy Netter Vibration (vpravo) [14]

Tab 3) Vybrané pístové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar

typ	Vibrace [min ⁻¹]	Odstředivá síla [N]	Spotřeba vzduchu [l/min]	Hmotnost [kg]
Webac VP 14	6200	1475	61	0,78
Netter NTS 250 HF	5773	346	105	0,38

V podkategorii externích vibrátorů se nachází i vibrační stoly (Obr. 10a, b), které jsou často používány kvůli snadnému zacházení a jejich všestrannému využití. Vibromotor není v tomto případě uchycen k formě, ale k pracovní desce, která je uchycena ke stojnému rámu prostřednictvím systému pružin či vzduchových měchů. Jsou doporučeny frekvence kolem 100 Hz a vysoká amplituda přes 1 mm. Efektivita stolu je funkcí zrychlení přeneseného do betonové směsi. Obvykle se doporučuje zrychlení v rozsahu 3 až 10 g, vyššího se používá jen pro redukci doby trvání vibrací.

Zrychlení je ve vztahu s odstředivou silou vibromotoru, přičemž závisí na tom, zda je forma na stole pevně uchycena nebo jen volně položená. I díky tomu je velmi obtížné vyhodnotit výsledky vibrací, vzhledem k tomu, že se volně položené formy mohou po stole pohybovat. R. H. H. Kirkham sestavil rovnici přenášené práce do betonové směsi při vibracích [3]

$$W = c \cdot m \cdot y^2 \cdot f^3 \cdot t \quad (3)$$

kde W = přenesená energie [J]

c = koeficient tuhosti betonové směsi

m = hmotnost směsi [kg]

y = amplituda [mm]

f = frekvence [Hz]

t = čas [s]

Z této rovnice je patrné, že daleko větší vliv na přenos energie má amplituda než zrychlení, které je funkcí hmotnosti.



Obr. 10) Různé konstrukce vibračních stolů – a) indické společnosti N.DAS Industries (vlevo) [23]; b) indické společnosti Karan Engineering (vpravo) [24]

5 KONSTRUKCE VIBRAČNÍHO STOLU

Stůl bude primárně sloužit ke zhutňování betonových směsí v plastových formách na zámkovou dlažbu (Obr. 11). Jedná se o moderní a velmi jednoduchý způsob, jak vytvořit ideální příjezdovou komunikaci, parkoviště či chodníky pro pěší. Jednotlivé kostky jsou řazeny za sebe, přičemž dochází ke zpevněnému povrchu, který je navíc i dekorativní. Velkou výhodou je, že zničená kostka může být z dlažby vytažena a nahrazena novou. Tyto kostky jsou charakteristické tvarovým zámkem (Obr. 12a), který slouží především ke snadné montáži a zabraňují nechtěnému pohybu dlažby jako celku. Vyrábí se v mnoha barevných odstínech přidáváním barviva do hutněného betonu, což poskytuje možnost tvorby různých dekorativních prvků, ale také mohou sloužit jako oddělovací čára vyhrazených parkovacích míst při použití dlažby na parkovištích. V dnešní době jsou tyto dlažby zhotovovány v mnoha tvarových kombinacích (Obr. 12b).



Obr. 11) Plastová forma na dlažbu ve tvaru „kosti“ [25]



Obr. 12) a) Zámková dlažba s charakteristickým „zámkem“, možnost využití i u bazénů (vlevo) [26]; b) Moderní jednoduchý tvar kostek (vpravo) [27]

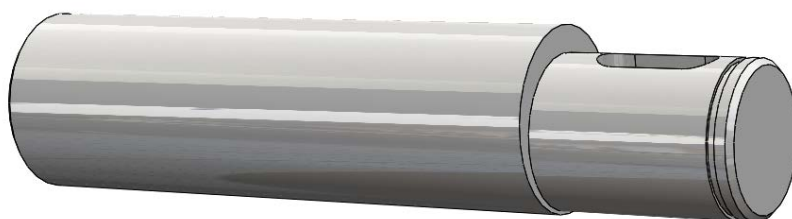
5.1 Způsob buzení vibrací

Byly uvažovány dva různé způsoby, jak generovat vibrace. Následně jsou porovnány z hlediska vhodnosti použití a vybrané vibrační zařízení je použito nadále v návrhu stolu.

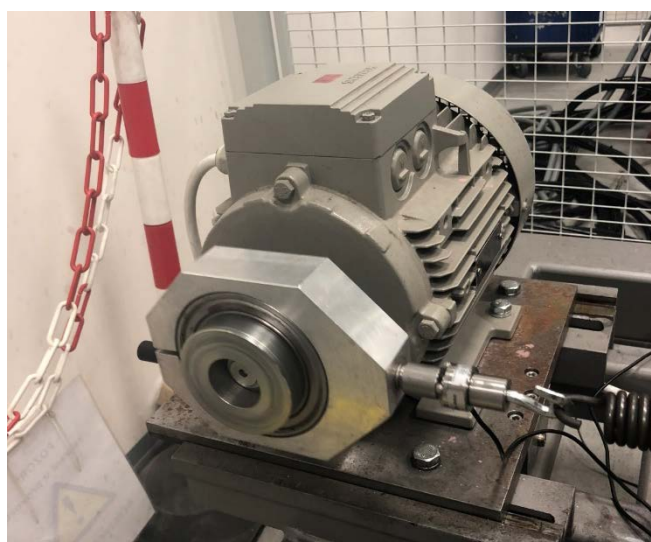
5.1.1 Nevývážený hřídel

První navržená varianta sestává z asynchronního třífázového elektromotoru, ke kterému je přes řemen připojen upravený hřídel. [15] Ten je při obrábění polohován tak, že je posunut oproti své centrální ose a následně je část plochy osoustružena (Obr. 13). Vznikne tak nevyvážený asymetrický hřídel, který je nasazen na elektromotor a osoustružená část po vyosení je uložena v ložiskovém domku. (Obr. 14).

Velkou výhodou konceptu je, že elektromotor není uchycen k samotné pracovní desce a tím pádem se nemusí nadále počítat s jeho váhou. Spojení s pracovní deskou probíhá prostřednictvím šroubového spoje. Výroba je velice jednoduchá, cenově přijatelná a montáž nezabere téměř žádný čas. Mezi nevýhody patří velké zatížení ložisek, přičemž bylo v praxi na fungujícím konceptu vyzorováno, že jsou již po několika minutách provozu velice horké, tudíž je razantně snížena jejich životnost a je nutná poměrně častá výměna.



Obr. 13) Nevývážený hřídel vzniklý vyosením obrobku



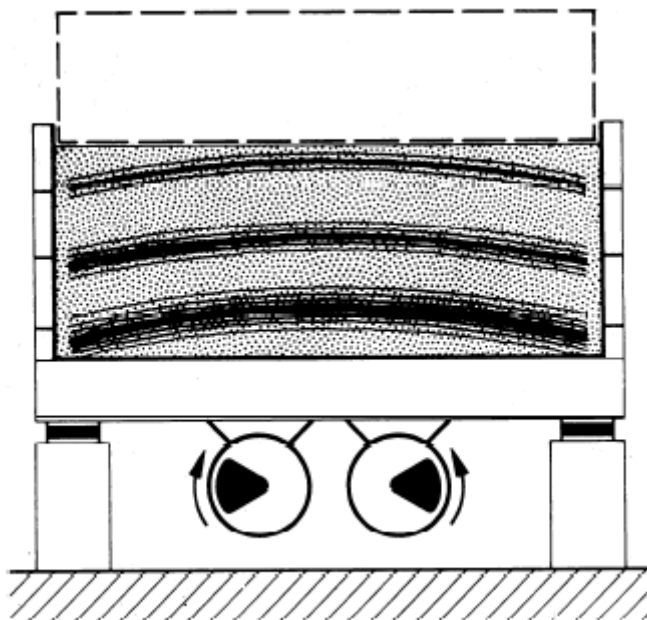
Obr. 14) Reálné zpracování jednoduchého budiče vibrací

5.1.2 Vibrační motor

Druhá varianta je založena na přimontovaném katalogovém vibromotoru, které jsou důkladněji popsány v podkapitole 4.3. Vibrační zařízení je připevněno přímo na pracovní desku, přesněji na plechový díl k ní přivařený. Vzhledem k faktu, že vibromotory generují odstředivou sílu, je vhodné použít dva vibrátory upevněné ve vzájemně opačném smyslu, aby docházelo pouze k lineárnímu svislému kmitání (Obr. 15).

Tohle řešení je zvýhodněno v oblasti jednoduchosti, jelikož zde figuruje pouze katalogový vibrační motor a není zapotřebí nic vyrábět. Jelikož je zamýšleno využití pneumatických měchů pro připevnění pracovní desky k rámu, je možné vybrat s pohonem na stlačený vzduch i příslušný vibrační motor. Nevýhodou je přídavné zatížení pracovní desky vlastní vahou vibračních motorů, jejíž konstrukce musí být odolná i vůči odstředivé síle.

Vzhledem k jednoduchosti a dlouhé životnosti druhé varianty, bude tedy nadále konstruován vibrační stůl s dvěma pneumaticky poháněnými vibromotory.



Obr. 15) Princip vibračního stolu s vibromotorem [3]

5.2 Volba vibračního motoru

Je nutné zvolit vibrační motor o dostatečné síle, z praxe je obecné pravidlo, aby byl motor schopen vibrovat se zrychlením alespoň 2-4g. [3] Pro vibrační stoly se jeví z kategorie pneumatických vibrátorů nejvhodnější použít turbínový vibromotor, jelikož dosahuje současně relativně vysokých frekvencí a odstředivé síly. Velkou výhodou je také možnost tyto hodnoty modifikovat přidáváním či ubíráním tlaku vzduchu.

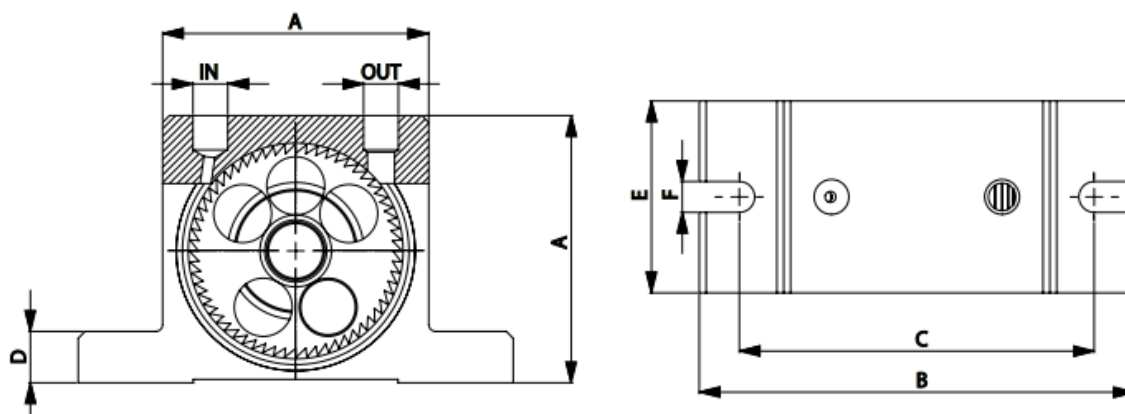
Předběžně je zvolen pneumatický turbínový vibromotor od firmy Pneutrol International limited, u nás prodáváný firmou HAS a.s., který dosahuje parametrů uvedených v tabulce Tab 5. Rozměrové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce Tab 6. Pro správnou funkci je dle výrobce doporučeno použít 2/2 cestný elektroventil a filtrovaný stlačený vzduch. Využívá se u sil, dopravníků suchých materiálů, při separaci materiálů nebo ke konsolidaci betonu na vibračních stolech.

Tab 4) Parametry zvoleného vibromotoru **OT25S** od firmy Pneutrol International limited [17]

Vibrace [min^{-1}]			Odstředivá síla [kg]			Spotřeba vzduchu [l/min]		
2 bar	4 bar	6 bar	2 bar	4 bar	6 bar	2 bar	4 bar	6 bar
9000	11000	13500	214	335	483	184	318	452

Tab 5) Rozměrové charakteristiky zvoleného vibromotoru (náčrt Obr. 16)

A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	X-Y	Hmotnost [kg]
80	128	104	16	56	9	1/4"	1,20



Obr. 16) Náčrt k rozměrovým charakteristikám vibromotorů [16]

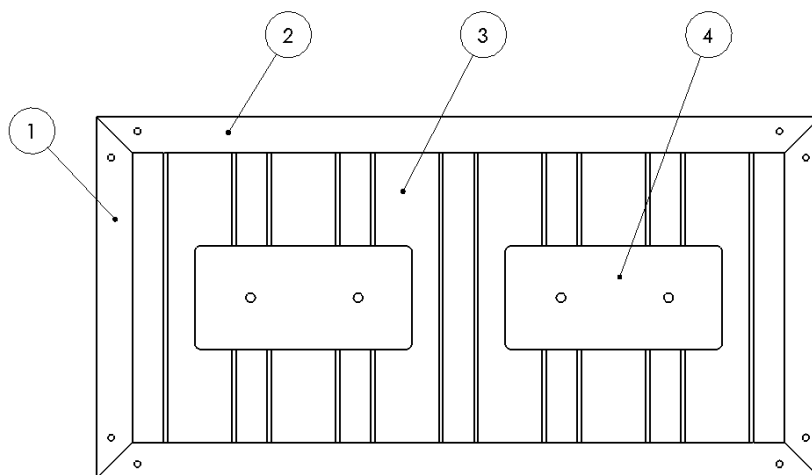
5.3 Návrh pracovní desky

Formy s betonovou směsí budou ukládány na pracovní desku, kterou představuje svařenec různých typů profilů z katalogu firmy Feron a.s., které jsou vyznačeny v tabulce Tab 6). Profily průřezu „U“ jsou upraveny seříznutím konců pod úhlem 45° pro lepší svařitelnost konstrukce do pravého úhlu. Všechny součásti jsou vyrobeny ze stejného materiálu, tj. **S235JR (1.0038) dle EN 10025-2** (Obdobná 11 375).

Tab 6) Použité díly na pracovní desku [22]

Označení	Katalogové číslo	Díl	Délka [mm]	Počet	Hmotnost [kg]
1	1F0538G	U40	350	2 ks	3,42
2	1F0538G	U40	750	2 ks	7,31
3	5M1825E	Jäkl 70x40x2	280	6 ks	5,30
4	200035D	Široká ocel 160x6	210	2 ks	3,17
		Svary			0,50
Celkem					19,70

Označení daného dílu v tabulce Tab 6) je znázorněno na obrázku Obr. 17), který představuje spodní pohled na pracovní desku. Celá konstrukce je svařena, je tedy nutné k celkové hmotnosti připočítat vlastní svary, jejichž návrhem se zabývá kapitola 6.5. Prvotně byl zamýšlen svrchní kryt v podobě plechu, to by však zbytečně zvyšovalo hmotnost konstrukce a vznikla by nepraktičnost v podobě nedostatečného odtoku přebytečné vody ve formách a byla by tak ztížena údržba.



Obr. 17) Dolní pohled navržené pracovní desky

Rám pracovní desky (Obr. 18a, b) nese ještě přimontované komponenty z tabulky Tab 7). Jedná se o dva vibromotory, vybrané v kapitole 7.2 a spojovací materiál, kterým jsou přichyceny ke konstrukci.

Tab 7) Použité přimontované díly

Označení	Díl	Počet	Hmotnost [kg]
1	Vibromotor OT25S	2 ks	2,40
2	Šroub M8x40 DIN 912	4 ks	0,10
3	Matice M8 DIN 934	4 ks	0,03
4	Podložka 8 DIN 125	8 ks	0,02
Celkem			2,55

Celková hmotnost pracovní desky je pak složená z hmotnosti samotné konstrukce (Tab 6), hmotnosti připevněných vibromotorů (Tab 7) a maximální požadované nosnosti, což představuje 50 kg. Hmotnost je tedy

$$m_C = m_{DESKA} + m_{NOSNOST} + m_{VIBROMOTOR} = 19,70 + 50 + 2,55 = 72,25 \text{ kg} \quad (4)$$

odkud je celková tíhová síla desky

$$F_G = m_C \cdot g = 72,25 \cdot 9,81 = 708,75 \text{ N} \quad (5)$$

Z rovnice 5 je patrné, že zvolený vibromotor generující odstředivou sílu 2100 N již při tlaku 2 bar je plně dostačující. Z rovnice 2 je možné určit při tlaku 2 bar zrychlení $a = 3g$ a při tlaku 6 bar zrychlení $a = 6,7g$.



Obr. 18) a) Horní pohled na pracovní desku; b) Spodní pohled na pracovní desku

5.3.1 Pevnostní analýza

Pro tento model je nejvhodnější využít pevnostní analýzu za pomoci MKP. Metoda konečných prvků je obecná numerická metoda, která může být využita k řešení celé řady úloh. Kromě problémů mechaniky (statiky a dynamiky pevných a poddajných těles) se běžně využívá pro modelování proudění tekutin, pro úlohy vedení tepla, k analýze elektromagnetických polí a podobně. Atraktivita metody vyplývá z její poměrně velké univerzálnosti a schopnosti popsat i značně komplikované a rozsáhlé problémy. Metoda je také velmi snadno algoritmizována. K určitým nevýhodám patří poměrně velká výpočetní náročnost – metodu nelze prakticky použít bez výpočetní techniky, a to ani pro úlohy, které by byly jinou metodou řešitelné ručním výpočtem. [19], [21]

Model byl vytvořen v software Solidworks 2018 a následně exportován jako .step soubor do programu Ansys Workbench 17.0. Prostředí nabízí mnoho různých druhů konečných prvků a automaticky z těla 3D modelu generuje výpočtovou síť složenou z kvadratických tetraedrů či hexaedrů. Vzhledem k jedinému použitému materiálu na celou konstrukci, byl model ihned po importu spojen do jednoho těla (*body*), přičemž byly postupně zadány parametry materiálu dle značky oceli S235JR (Obr. 19) jako hustota, mez kluzu v tahu, mez kluzu v tlaku a mez pevnosti v tahu.

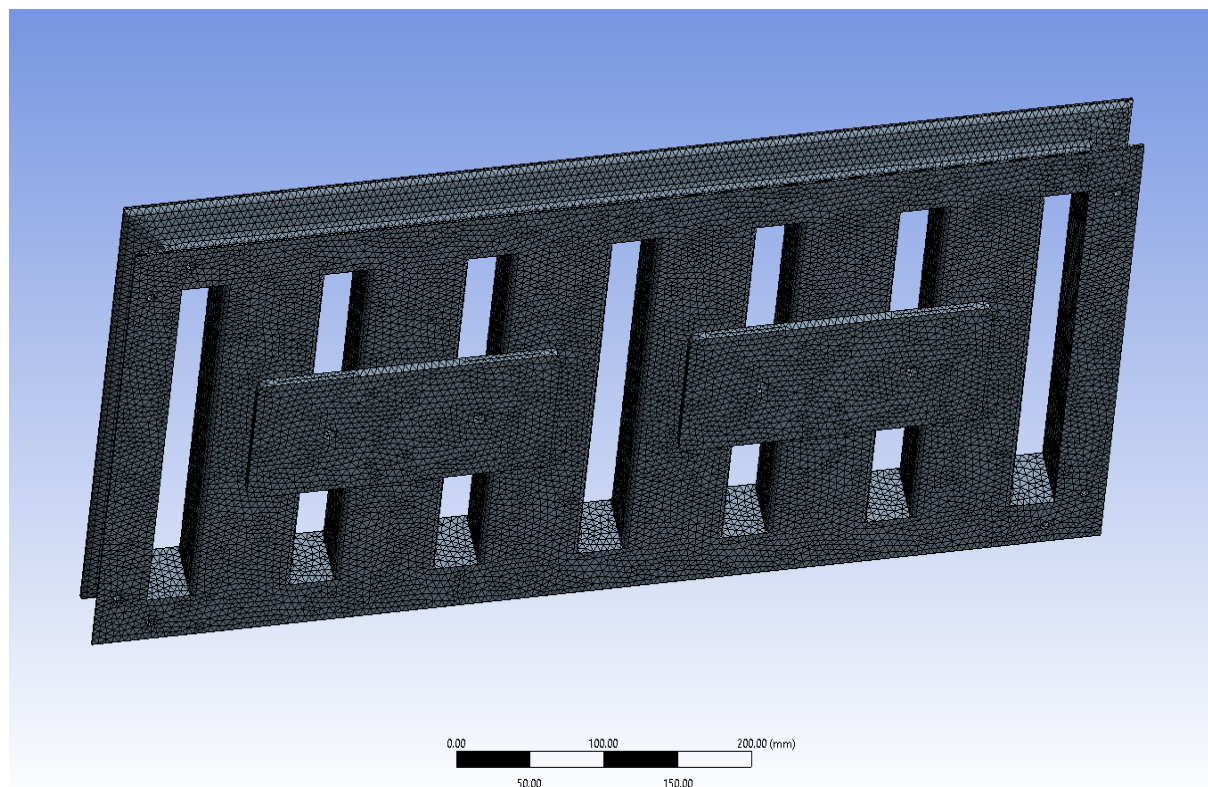
Přehled vlastností oceli S235JR							1.0038	
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel							
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005							
Dřívější označení	S235JRG2 podle EN 10025: 1990 + A1: 1993; RSt 37-2 podle DIN 17100; 11 375 podle ČSN							
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C max. pro tloušťku v mm			Mn max.	Si max.	P max.	S max.	N max.
	≤16	>16≤40	>40 ¹⁾					
	0,17	0,17	0,20	1,40	-	0,035	0,035	0,012
Složení hotového výrobku	0,19	0,19	0,23	1,50	-	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	Minimální mez kluzu R _{eH} MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :							
	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250
	235	225	215	215	215	195	185	175
	Pevnost v tahu R _m MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :							
	≥ 3≤ 100			>100≤150			>150≤250	
	360-510			350-500			340-490	
	Minimální tažnost v % (L ₀ = 5.65√S ₀) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm ⁵⁾ :							
	> 3 ≤ 40		> 40 ≤ 63		> 63 ≤ 100		> 100 ≤ 150	
	26		25		24		22	
							21	
	Minimální nárazová práce KV (J) při 20°C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm : ^{2), 3)}							
	≤150				>150≤250			
27 ⁴⁾				27 ⁴⁾				
Maximální hodnota CEV ³⁾	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
	≤ 30		> 30 ≤ 40		> 40 ≤ 150		> 150 ≤ 250	
	0,35		0,35		0,38		0,40	
Technologické vlastnosti								
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 (EN 1011).							
Tváření za tepla	Jsou-li dodávány výrobky dále tvářeny za tepla, splňují uvedené mechanické vlastnosti pouze po následném normalizačním žitání.							
Tvařitelnost za studena	Ocel určená pro tváření za studena musí být označena písmenem C (S235JRC). To se týká i tažení za studena.							

Obr. 19) Přehled parametrů oceli značky S235JR [16]

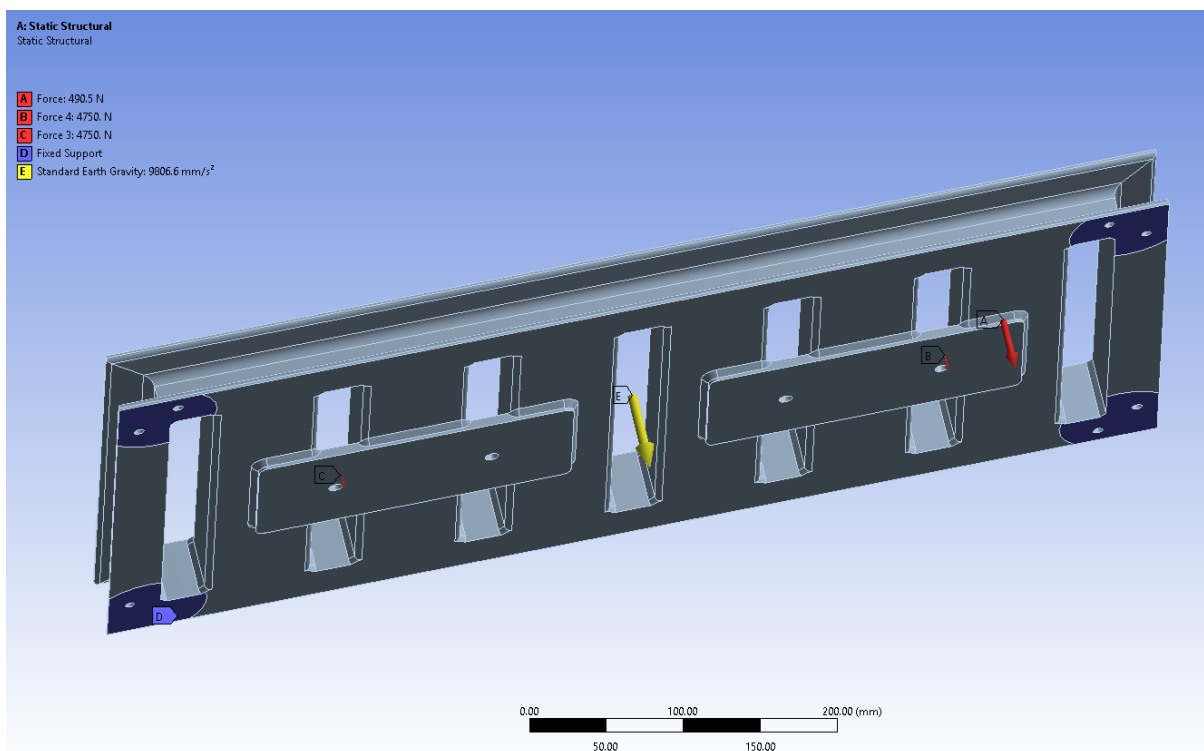
Následně byla vygenerovaná síť konečných prvků (Obr. 20) se standartním nastavením, přičemž bylo změněno *Element size* (velikost prvku) na hodnotu 5 mm a *Behavior* (chování při generování sítě) na hodnotu Soft (zajistí, že program nemusí dodržet zadaných 5 mm), *Relevance* na hodnotu 100% a *Relevance center* na hodnotu Medium (tím je zajištěná poměrně vysoká hustota bodů vygenerované výpočetní sítě, co má za následek přesnější výpočet).

Největší deformace bude pravděpodobně nastávat v místě uchycení vibromotorů, toto místo je tedy navrženo tak, aby zde bylo napětí co nejvíce potlačeno. Je řešeno kusem široké oceli o tloušťce 3 mm přivařeném ke konstrukci.

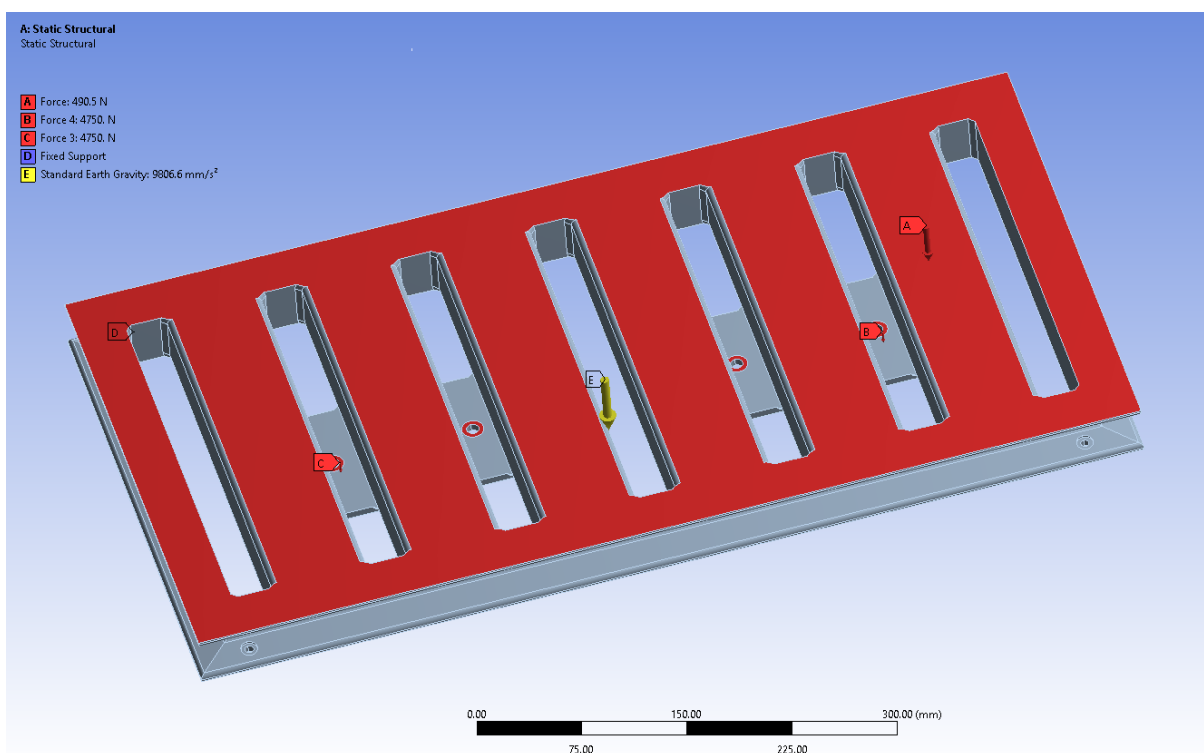
Jako další krok jsou zavedeny okrajové podmínky, tedy podpory a zatížení (Obr. 21, 22). Zatížení je od požadované nosnosti 50 kg (A), tj. 490,5 N, které působí na celou horní plochu konstrukce, dále odstředivé síly generované jednotlivými vibromotory, kde je také zahrnutá jejich váha (B, C), a nakonec jsou zde nastaveny pevné podpory (D), i když jsou v reálné situaci v tomto místě měchy na stlačený vzduch. Je to především z důvodu značného zjednodušení výpočtu, přičemž je zachována správnost výsledných hodnot. V momentě maximální amplitudy se vzduchový měch totiž chová, jakoby byl pevnou podporou a vzniká zde tak největší napětí, proto není nutné provádět analýzu i v dalších částech pohybu. V modelu jsou přidány plochy v rozích konstrukce, které vytváří přesné místo působení reakčních sil od měchů. Tyto plochy jsou vytvořeny odebráním materiálu, tudíž se dá předpokládat, že ve výpočtu vznikne v tomto místě vyšší napětí, než v reálné situaci. Nakonec je zahrnutá gravitační síla na celé těleso (E).



Obr. 20) Vytvořená síť konečných prvků



Obr. 21) Spodní pohled na nastavené parametry



Obr. 22) Horní pohled na nastavené parametry

Jak se dalo již předpokládat, největší průhyb bude v oblasti mezi uchycením vibromotorů (Obr. 23). Zde dosahuje maximální hodnoty 0,188 mm. Maximální napětí je složitější určit, jelikož v modelu chybí reálné svary a s modelem se počítá jako s celistvým jedním tělem. Svary jsou v důležitých místech nahrazeny pouze zkosením o velikosti 4 mm. Dochází k akumulaci napětí v místech odebraného materiálu pro přesnější umístění podpór a zatěžující síly od vibromotorů, které v tomto směru přenášejí hlavy šroubů (Obr. 21, 22). Napětí je pak zvýšeno kvůli omezení pohybu pouze v jedné ose a profil se tak láme. K dalšímu hromadění napětí dochází v rozích, tedy v místě kde budou dva U profily svařeny k sobě. Tyto místa budou tedy zanedbány a v úvahu připadne místo, kde by dle naznačeného průhybu mohlo dojít k největší akumulaci napětí. To se nachází mezi dvěma držáky na vibrační motory a hodnota zde dosahuje 42,47 MPa, ačkoliv se v blízkosti tohoto místa také nachází oblast s chybějícím svarem, čímž může být ovlivněno a reálná bezpečnost bude vyšší.

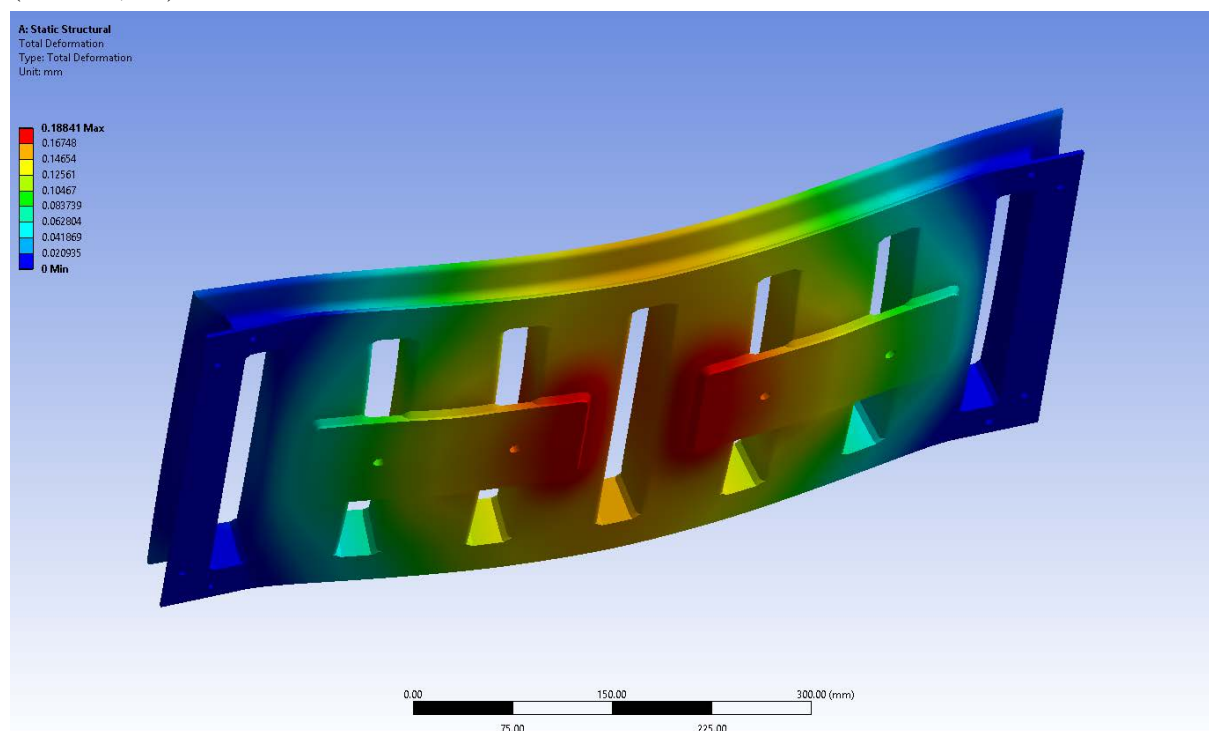
Mezní stav pružnosti nastává, pokud je napjatost v konstrukci rovna mezi kluzu σ_K . Celkový součinitel bezpečnosti je pak roven podílu meze kluzu a redukovaného napětí, tedy

$$k_k = \frac{\sigma_K}{\sigma_{RED}} \quad (6)$$

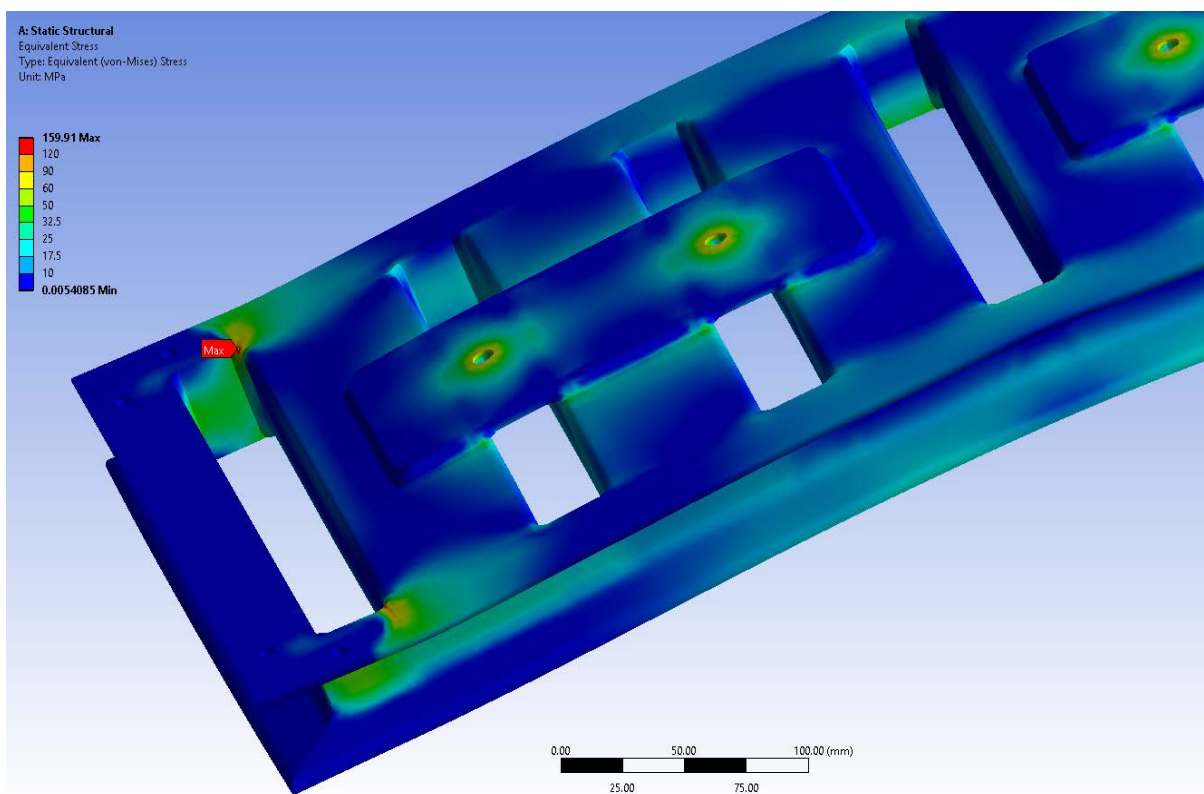
přičemž redukované napětí σ_{RED} vychází z podmínky plasticity HMH jako

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

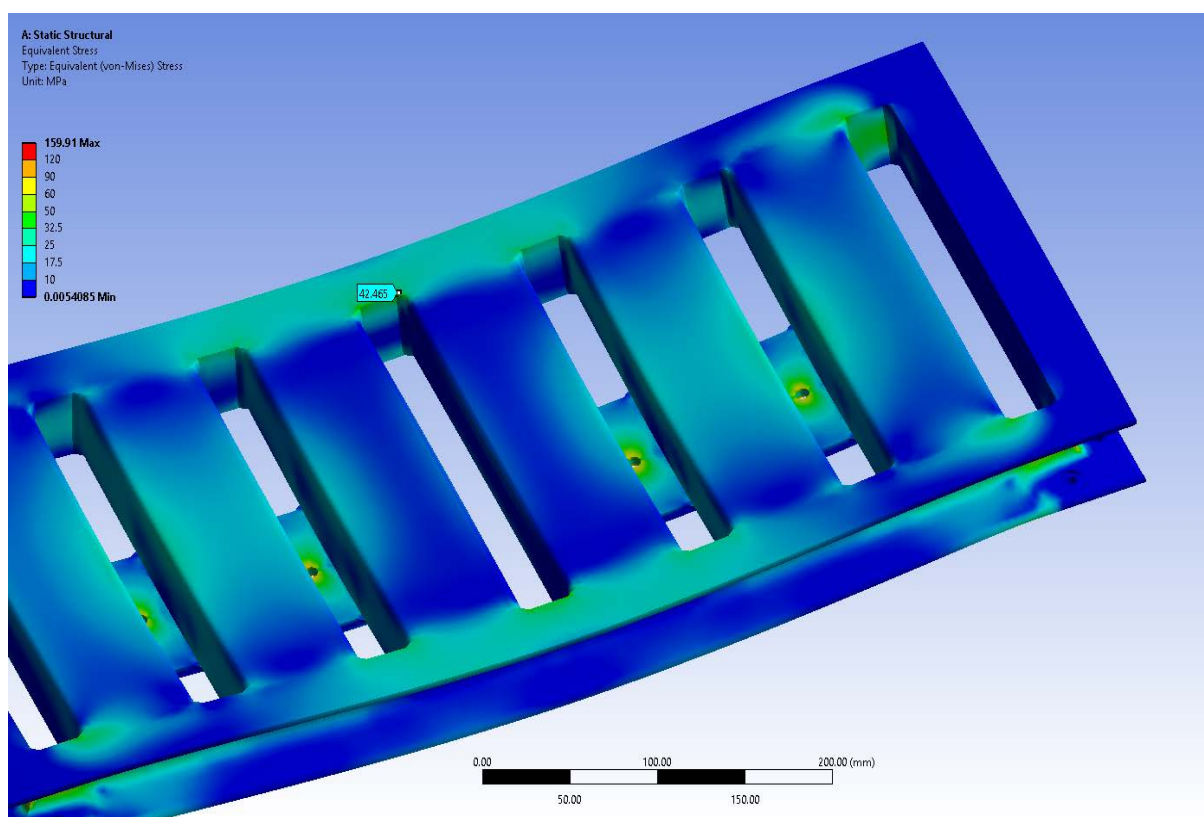
Tento vztah však platí jen v případě prosté pružnosti, tj. u zatěžování s lineárním průběhem. V programu Ansys lze redukované napětí σ_{RED} najít v grafu *Equivalent (von-Mises) Stress* (Obr. 24, 25).



Obr. 23) Maximální průhyb konstrukce



Obr. 24) Maximální napětí konstrukce



Obr. 25) Skutečné maximální napětí konstrukce

Výsledná bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti tedy dosahuje

$$k_k = \frac{\sigma_K}{\sigma_{RED}} = \frac{235}{42,47} = 5,53 \quad (8)$$

Mez únavy v ohybu se vypočte ze vztahu

$$\sigma_c = 0,504 \cdot Re = 0,504 \cdot 360 = 181,5 \text{ MPa} \quad (9)$$

Vzhledem k zatížení 42,47 MPa je namáhání menší než mez únavy a nedojde k jejímu překročení, tudíž součást z hlediska vysokocyklové bezpečnosti vyhovuje.

5.4 Volba pružného uložení

Nezbytnou součástí sestavy jsou pružné vazby mezi pracovní deskou a hlavním rámem. Ten je následně přimontovaný k podlaze skrz vyhrazené otvory ve spodní části, aby nedocházelo k pohybu celého stolu během provozu. Celý koncept je zamýšlený s náhonem na stlačený vzduch, jelikož tato platforma nabízí obrovské množství nastavení parametrů pouhou změnou tlaku média. Po prozkoumání trhu byl vybrán vzduchový měch od firmy IMI Norgren s.r.o., konkrétně model PM/31021 (Obr. 26). Na obrázku Obr. 27 jsou vyznačeny jeho parametry.

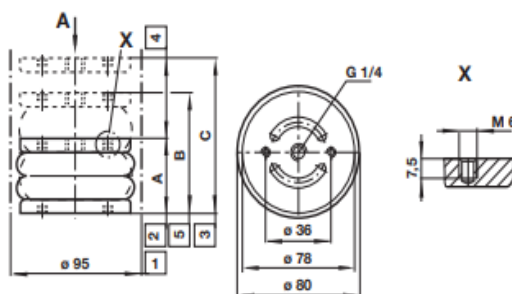
Jedná se o pneumatický měch s provozem bez tření, není třeba žádného mazání ani jiné údržby, je ideální pro použití při krátkých amplitudách a velkém zatížení. Provoz je možný i s vychýlením až 30°. Obsahuje, stejně jako vibrační motor, závit G1/4" na napojení hadice od kompresoru, přičemž povolený tlak je 0 - 8 bar.



Obr. 26) Pneumatický měch IMI Norgren PM/31021 [18]

Dimensions

PM/31021,
PM/31022,
PM/31023



Dimensions in mm
Projection/First angle



- 1 Installation diameter min.
- 2 Installation height min.
- 3 Installation height max.
- 4 Stroke
- 5 Recommended max. working height

Table 1

Nominal Ø (inch) x convolutions	Stroke (mm)	Installation height [A] min. (mm)	Recommended working height [B] max. (mm)	Installation height [C] max. (mm)	Max. torque for mounting studs (Nm)	Natural frequency [fn] at 4 bar (Hz)	Stiffness at 4 bar (N/mm)	Recommended vibration height [mm]	Weight (kg)	Model
2 3/4" x 1	20	50	65	70	5	5,3	131	60	0,35	PM/31021
2 3/4" x 2	45	65	105	110	5	3,65	49,4	90	0,4	PM/31022
2 3/4" x 3	60	80	130	140	5	—	—	—	0,5	PM/31023

Obr. 27) Parametry vzduchového měchu – model PM/31021 je v tabulce umístěn nahoře [18]

Následně je nutné zhotovit výpočet, vypovídající o dostatečné síle zvoleného měchu. Pracovní deska včetně její nosnosti má celkovou hmotnost 72,25 kg, to odpovídá síle 708,75 N, která musí být zdvižena (viz kapitola 5.3). Vzhledem k použití čtyř měchů, kde do každého rohu je umístěn jeden, lze tuto sílu rozdělit mezi každý z nich, výsledná síla F_{Mech} působící na každý z měchů je pak tedy

$$F_{Mech} = \frac{F_G}{4} = \frac{708,75}{4} = 177,2 \text{ N} \quad (10)$$

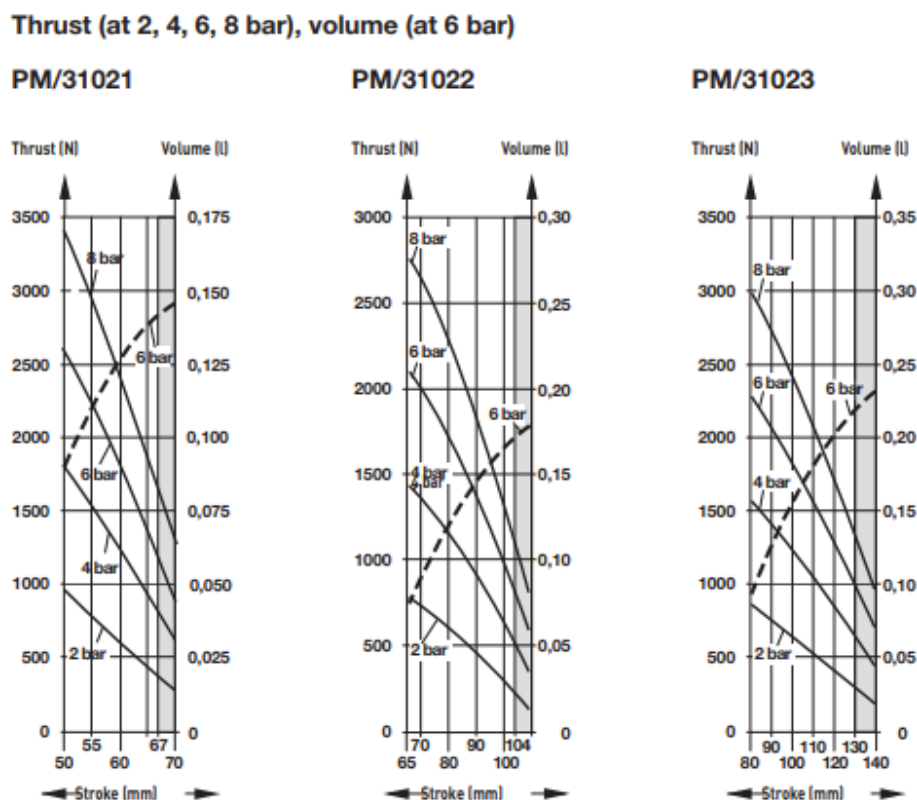
Na obrázku Obr. 28 je znázorněn graf závislosti síly měchu na tlaku vzduchu v něm. Při tlaku 2 bar a minimální výšce doporučené výrobcem 50 mm dokáže nést vybraný model PM/31021 sílu F_{Max} o velikosti 965 N. Při zdvihu 15 mm na maximální doporučenou pracovní výšku 65 mm je pak síla F_{Min} při tlaku 2 bar rovna 430 N. Odtud lze snadno vypočítat bezpečnost v minimální pracovní výšce k_{min} resp. v maximální doporučené výšce k_{max} z rovnic

$$k_{min} = \frac{F_{Max}}{F_{Mech}} = \frac{965}{177,2} = 5,45 \quad (11)$$

resp.

$$k_{max} = \frac{F_{Min}}{F_{Mech}} = \frac{430}{177,2} = 2,43 \quad (12)$$

Zvýšením tlaku však tyto bezpečnosti rapidně rostou, tudíž je vybraný pneumtický měch plně vyhovující.

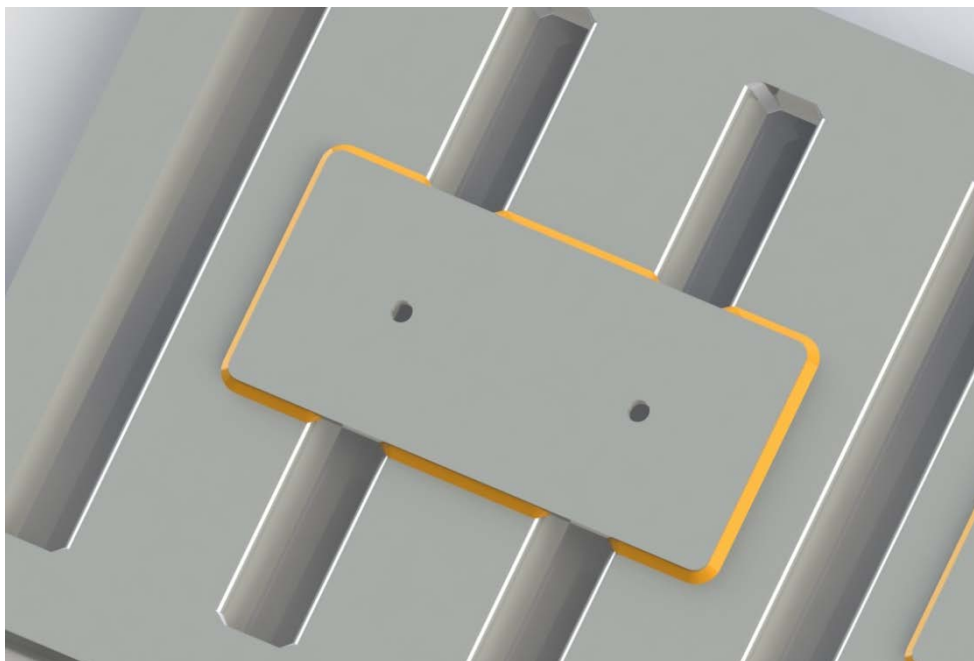


Obr. 28) Závislost zdvihové síly měchu na tlaku vzduchu [18]

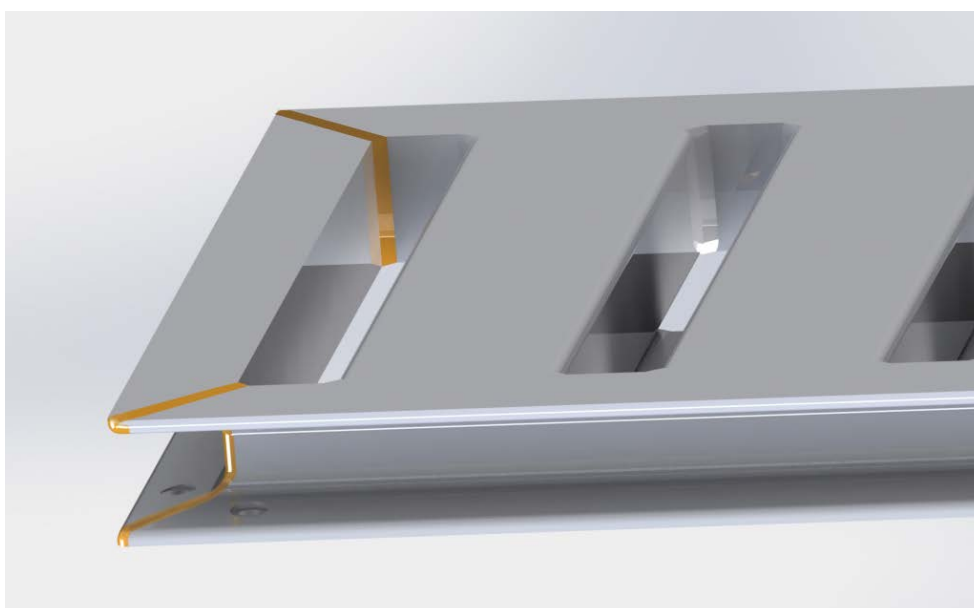
5.5 Kontrola svarových spojů [20]

Svařování patří mezi moderní způsob spojování různých dílů a hojně nahrazuje nýtování či náročné odlévání složitějších dílů. Následující vztahy jsou však pro idealizovaný stav, přičemž reálně není možné zajistit symetrický tvar a navíc zde působí kombinované napětí.

Z obrázku Obr. 23 je zřejmé, které svary budou nejvíce namáhané. Budou zkontrolovány svary spojující plechové uchycení vibračního motoru k rámu (Obr. 29). Svary v rozích samotné konstrukce, kde se spojují dva U profily, jsou zobrazeny na Obr. 30.



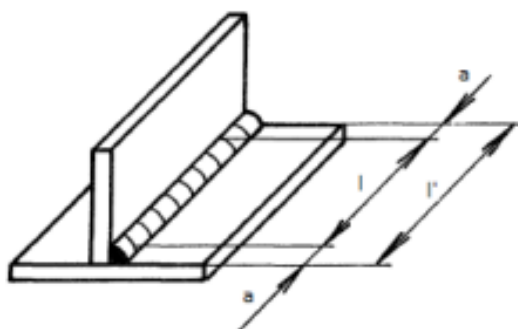
Obr. 29) Svarové spoje na držáku vibračního motoru – vyznačeny oranžově



Obr. 30) Svarové spoje v rozích konstrukce – vyznačeny oranžově

U dynamicky zatěžovaných součástí se doporučuje využít vydutého koutového svaru, především kvůli menším vrubovým účinkům. Při pevnostní analýze se uvažuje za nebezpečný průřez obdélník, ležící ve středové rovině charakterizován délkou koutového svaru l a tloušťkou a , kde délka je oblast, ve které má svar po celou dobu plný průřez. [21] Z důvodu nedodržení tohoto průřezu na začátku a konci svaru (Obr. 31), je pak uvažována celková délka jako

$$l = l' - 2a \quad (13)$$



Obr. 31) Schéma k rovnici 11, celková délka svaru [21]

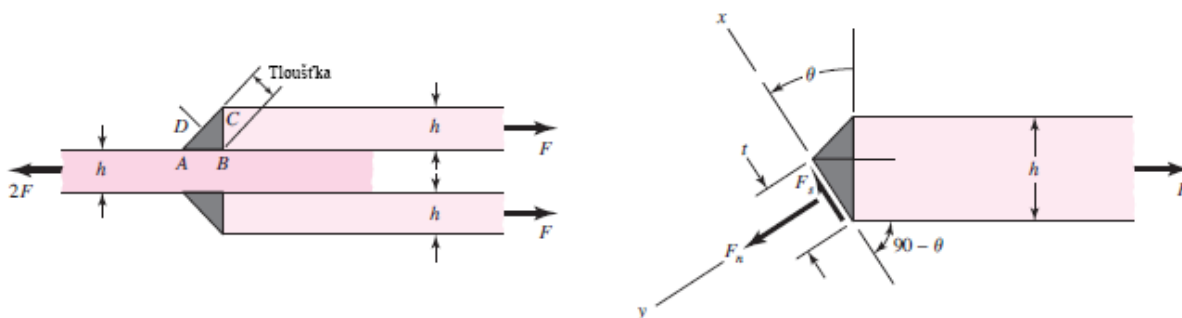
Koutový svar může být zatěžován rovnoběžnými silami, které namáhají svar smykovým napětím τ , nebo příčnými silami, které namáhají svar normálovým napětím σ (Obr. 32a). Důležitý je především přechod svaru do materiálu, v případě únavového zatěžování je vhodné přechody vybrousit, aby zde nedocházelo k disipaci napětí. Za pomoci lineární pružnosti byly odvozeny vztahy pro normálové a smykové napětí. Je-li vedená rovina pod úhlem θ , naznačená na obrázku Obr. 32b, pak velikosti normálové a posouvající síly jsou

$$N = F \cos \theta \quad (14)$$

$$T = F \sin \theta \quad (15)$$

a z geometrie trojúhelníku lze stanovit velikost účinného průřezu a' , který je závislý na úhlu θ

$$a' = \frac{h}{\sin \theta + \cos \theta} \quad (16)$$



Obr. 32) a) Čelní spoj s oboustrannými koutovými svary (vlevo); b) uvolněná část svarového spoje [20]

Odtud lze stanovit vztah pro nominální napětí působící v řezu

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{T}{a'l} = \frac{F}{hl} (\sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta) \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{N}{S} = \frac{N}{a'l} = \frac{F}{hl} (\cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta) \quad (18)$$

a následnou derivací rovnic 15, 16 podle θ a položením této derivace nule získáváme extrémní hodnoty při zatěžování příčnými silami. Vyskytují se při úhlu $\theta = 67,5^\circ$ pro τ_{max} a $\theta = 22,5^\circ$ pro σ_{max} a mají tvar

$$\tau_{max} = \frac{1,207 \cdot F}{hl} \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,207 \cdot F}{hl} \quad (20)$$

Maximální hodnota smykového napětí při zatěžování rovnoběžnými silami vzniká v průřezu s nejmenší plochou, rovina tohoto napětí je pod úhlem $\theta = 45^\circ$, odtud tedy

$$\tau_{max} = \frac{1,414 \cdot F}{hl} \quad (21)$$

5.5.1 Držák vibračního motoru

Jedná se o spojení široké oceli 210x100x6 a obdélníkového jáklu 70x40x2. Minimální účinná tloušťka svaru dle ČSN 731401 je pro materiály o tloušťce $t < 10$ mm rovna $h_{min} = 3$ mm. Je volen koutový svar o tloušťce

$$h = \frac{2}{3} \cdot t_{ocel} = \frac{2}{3} \cdot 6 = 4 \text{ mm} \quad (22)$$

Maximální zatěžující síla je dle tabulky Tab. 4 při tlaku 6 bar

$$F = 483 \cdot 9,81 = 4738 \text{ N} \quad (23)$$

pak smykové napětí v koutovém svaru při zatěžování příčnou silou je

$$\tau_{max} = \frac{1,207 \cdot F}{hl} = \frac{1,207 \cdot 4738}{4 \cdot (2 \cdot 195,7 + 2 \cdot 78,3)} = 2,61 \text{ MPa} \quad (24)$$

kde při zvolené svařovací elektrodě E7018 je dovolené smykové napětí ve svaru

$$\tau_{dov} = 145 \text{ MPa} \quad (25)$$

Tyto hodnoty jsou však pouze informativního charakteru, jelikož není možné zajistit ideální stav popisovaný ve vztazích výše. Ve skutečnosti bude napětí ve svaru mnohonásobně vyšší.

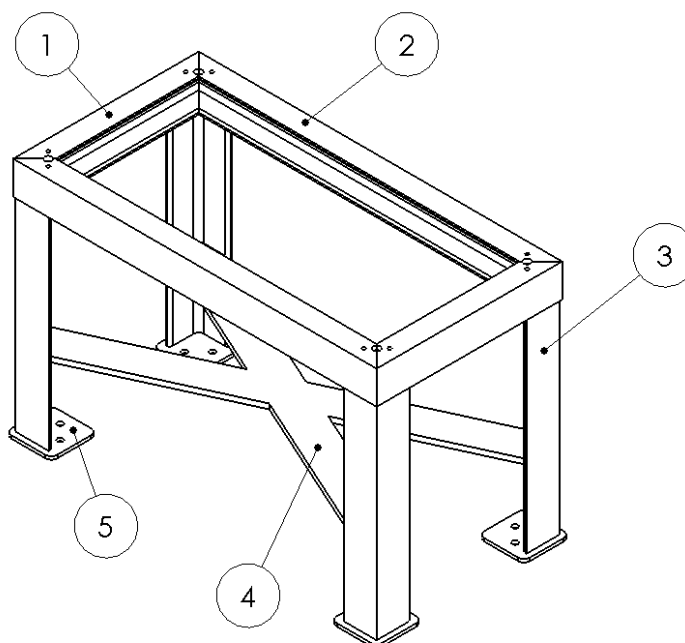
5.6 Návrh nosného rámu

Pracovní deska je prostřednictvím pneumatických měchů přichycena k nosnému rámu stolu. Jedná se také o svařenec různých typů profilů z katalogu firmy Feron a.s., sepsány v tabulce Tab 8. Všechny součásti jsou vyrobeny ze stejného materiálu, tj. **S235JR (1.0038) dle EN 10025-2** (Obdobná 11 375).

Tab 8) Použité díly na nosný rám [22]

Označení	Katalogové číslo	Díl	Délka [mm]	Počet	Hmotnost [kg]
1	1F05200	U65	365	2 ks	5,18
2	1F05200	U65	715	2 ks	10,14
3	1H0838Y	L 80x80x8	400	4 ks	15,41
4	215401P	Plech	157 kg/ks		7,25
5		2000x1000x10			6,42
		Svary			0,50
Celkem					44,90

Schematicky jsou pak zaznačeny jednotlivé díly z tabulky Tab. 8 na obrázku Obr. 33. Na pozici 5 je pak výpalek z plechu o rozměrech 694x344x10 sloužící jako vzpěra, jehož finální objem je 0,93 dm³ a hmotnost 7,25 kg. Ze zbytků tohoto plechu jsou vytvořeny patky, které jsou následně navařeny na L profily a slouží k ustavení a přimontování stolu k podlaze.



Obr. 33) Schématický pohled navrženého rámu

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o konstrukčním návrhu vibračního stolu, který bude sloužit ke zhutňování betonu v plastových formách při výrobě zámkové dlažby. Nejprve ze všeho jsou zpracovány vlastnosti a složení betonu, následně samotný proces hutnění. Poté jsou rozděleny vibrátory na vnitřní, povrchové a vnější a jsou uvedeny ke každé kategorii vlastnosti a použití.

Po této úvodní rešerši bylo nutné vymyslet způsob buzení vibrací, přičemž byly vytvořeny dva koncepty. Jako první byl sestaven jednoduchý budič vibrací založen na principu rotování nevyváženého hřídele, který je z jedné strany napojen na třífázový asynchronní elektromotor a z druhé uložen v ložiskovém domku. Tato varianta je levná na realizaci, jelikož je požadovaný hřídel vyroben pouhým posunutím v obráběcím zařízení mimo svou centrální osu. Následně se zakoupí elektromotor a vhodné ložisko, které je uchyceno do jednoduchého přípravku. Takové provedení bylo v praxi vyzkoušeno a bohužel není moc efektivní, již po několika minutách provozu dochází k silnému zahřívání ložiska, které má razantně sníženou životnost a je nutné je po čase vyměnit. Parametry lze řídit frekvenčním měničem, respektive změnou otáček elektromotoru.

Byla tedy sestavena vhodnější varianta s pneumatickým vibromotorem, přičemž je vybrán z katalogu vhodný model o dostatečné síle. Budou použity dva motory umístěné proti sobě, aby se vzájemně vyrušila vodorovná složka generované odstředivé síly. Co se týče ekonomické stránky, je tato metoda poněkud dražší na realizaci, avšak nabízí poměrně dlouhou životnost a možnost nastavování různých parametrů pouhou změnou tlaku. Tyto motory jsou pak spojeny napevno s pracovní deskou prostřednictvím příslušných přivařených držáků, kde byla nejprve využitím metody konečných prvků zkontrolována celá deska na průběh napětí a bezpečnost, ale následně také samotné svary v kritickém místě.

Pracovní deska je uložena na čtyřech pneumatických měších, aby bylo možné použít jeden společný pohon na stlačený vzduch, který nabízí širokou škálu nastavení parametrů. Tyto měchy jsou opět vybrány z katalogu, důležitá je pak jejich zvedací síla. Opět se jedná o výhodnou variantu v poměru cena/výkon, respektive tyto měchy jsou bezúdržbové. Jsou připevněny na hlavní rám, který je vyztužen výpalkem a je na konci přimontovaný k zemi, aby nedocházelo k jeho pohybu za provozu.

Výsledkem této práce je pak vibrační stůl, který byl navržen s co nejjednodušší odolnou konstrukcí a vhodným pohonem vibrátorů na stlačený vzduch. Byly využity programy Solidworks 2018, Ansys Workbench 17.0 a Microsoft Office 2016.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HELA, R. Technologie betonu I. BJ04 - Technologie betonu I. Brno: 2005.
- [2] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Stavební hmoty 1: BETON*. Ostrava, 2013. FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [3] ACI COMMITTEE 309. Behavior of Fresh Concrete During Vibration. Journal of the american concrete institute. 1981, 1981(R-93), 36-53.
- [4] Proč používat vibrátory do betonu?. Kohut [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.kohut.cz/proc-pouzivat-vibratory-do-betonu-86-info
- [5] Zhutňování čerstvých betonů. Stavební technika [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.stavebni-technika.cz/clanky/zhutnovani-cerstvych-betonu
- [6] KISEU, Emmanuel Kimuyu a Alex NJIRA. *DESIGN OF A CONCRETE VIBRATING TABLE*. 2015. UNIVERSITY OF NAIROBI.
- [7] Jak vybrat ponorný vibrátor?. Manek [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.maneck.cz/clanky/69/-jak-vybrat-ponorny-vibrator-
- [8] Vibrační lišta na beton Atlas Copco BV 20 E. In: Manek [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: www.maneck.cz/cache/20020080dynapac_zpracovani_betonu_bv_20_e_0001.jpg
- [9] Příhradová vibrační lišta Atlas Copco BT 90. In: Manek [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: www.maneck.cz/cache/20020080dynapac_zpracovani_betonu_bt_90_0001.jpg
- [10] Modely vibromotorů. ItalVibras [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: www.italvibras.it
- [11] Pneumatic vibrator VKS model. In: VibraFrance [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: www.vibrafrance.fr/c/45-category_default/pneumatic-vibrator-vkvks-models-ball.jpg
- [12] RTI PNEUMATIC VIBRATORS. In: RTI Vibrators [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.rti-to.it/en/products/automation-division/rti-vibrators/>
- [13] Pneumatické vibromotory. In: Webac Vibro [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.webac-vibro.com/index.php?menu=pneumaticke-vibromotory>

- [14] Pístové vibrátory. *Netter Vibration* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.nettervibration.com/product-line/pneumatic-linear-vibrators-series-nts/?lang=en
- [15] OSADNÍK, S. *Návrh vibračního stolu pro betonářské výrobky*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. Katedra částí a mechanismů strojů, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [16] Přehled vlastností oceli S235JR. *Bolzano* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf
- [17] OLI Pneumatic Turbine Vibrators. *Pneutrol Spares* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.pneutrolspares.com/subproductsspare/sp/oli-pneumatic-turbine-vibrators-ot-1432/>
- [18] Kompaktní měchové válce. *IMI Precision Engineering* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: d25g25bk48as5o.cloudfront.net/pdf/en_1_8_001_PM_31000.pdf
- [19] JIŘÍ, Brožovský a Materna ALOIS. *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ VE STAVEBNÍ MECHANICE* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2018-05-23]. VŠB–TU Ostrava.
- [20] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [21] KRÁL, J. *Napěťová, deformační a spolehlivostní analýza svařované rámové konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 43 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c..
- [22] Katalog profilů a plechů. *Ferona* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/sortiment/sortiment.php>
- [23] Vibrační stůl N.DAS. *N.DAS Industries* [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu PNG. Dostupné z: <http://www.vibratoromotor.in/wp-content/uploads/2015/07/vibrating-tables.png>
- [24] Vibrační stůl. *Karan Engineering* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.karanengineering.co.in/vibrating-tables.htm>
- [25] Zámková dlažba "kost". *Formy.sk* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.formy.sk/gallery/zamkova_dlazba/kost.jpg
- [26] Zámková dlažba Vladyka. *Stanislav Vladyka* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://media1.mypage.cz/images/_tmb/media1:4ba945d03249d.png/BAZ%C3%89N.bmp.png

- [27] Zámková dlažba Kaiserbeton. *Kaiserbeton.sk* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://kaiserbeton.sk/?attachment_id=158
- [28] Betonové prvky v interiéru. *Architonic* [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: image.architonic.com/img_pfm2-2/208/6506/beton-y75280001-hellgrau-b.jpg
- [29] Betonové prvky v exteriéru. *Stone Style* [online]. [cit. 2018-05-23]. Obrázek ve formátu JPEG. Dostupné z: <http://www.stone-style.be/sites/default/files/images/front/Web-Megategels%20Carreau%20100x100%20Arduin-Arduna%20%28CD%208%20-%20Hoeselt%20%20-%20nr%2039%29%20Toepassing%20Terras.jpg>

8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

8.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Vybrané kuličkové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar	20
Tab 2)	Vybrané turbínové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar	21
Tab 3)	Vybrané pístové vibromotory s jejich parametry při tlaku 6 bar	22
Tab 4)	Parametry zvoleného vibromotoru OT25S od firmy Pneutrol International limited [16]	26
Tab 5)	Rozměrové charakteristiky zvoleného vibromotoru (náčrt obr. 15)	26
Tab 6)	Použité díly na pracovní desku [21]	27
Tab 7)	Použité přimontované díly	28
Tab 8)	Použité díly na nosný rám [21]	40

8.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	a) Interiér s betonovými prvky [28]; b) exteriér s využitím betonu u vegetační plochy [29]	11
Obr. 2)	Schéma základních složek betonu [1]	13
Obr. 3)	a) Ponorný vibrátor s ohebnou hřídelí (nahore); b) průřez vibrační hlavou (dole) [6]	17
Obr. 4)	a) Ponorný elektrický vibrátor s motorem v hlavě (nahore); b) průřez hlavou (dole) [6]	18
Obr. 5)	a) dokončovací vibrační lišta Atlas Copco BV 20 E (vlevo) [8]; b) příhradová lišta Atlas Copco BT 90 (vpravo) [9]	18
Obr. 6)	Nízkofrekvenční elektrický vibromotor (nahore) [10]	19
Obr. 7)	Kuličkový vibromotor od firmy VibraFrance - VKS Series [11]	20
Obr. 8)	Turbínové vibromotory – a) od italské firmy RTI - typ T9 (vlevo) [12]; b) od firmy Webac Vibro s.r.o. (vpravo) [13]	21
Obr. 9)	Pístové vibromotory – a) od firmy Webac Vibro s.r.o. (vlevo) [13]; b) od firmy Netter Vibration (vpravo) [14]	21
Obr. 10)	Různé konstrukce vibračních stolů – a) indické společnosti N.DAS Industries (vlevo) [23]; b) indické společnosti Karan Engineering (vpravo) [24]	22
Obr. 11)	Plastová forma na dlažbu ve tvaru „kosti“ [25]	23
Obr. 12)	a) Zámková dlažba s charakteristickým „zámkem“, možnost využití i u bazénů (vlevo) [26]; b) moderní jednoduchý tvar kostek (vpravo) [27]	23
Obr. 13)	Nevyvážený hřídel vzniklý vyosením obrobku	24
Obr. 14)	Reálné zpracování jednoduchého budiče vibrací	24

Obr. 15) Princip vibračního stolu s vibromotorem [3]	25
Obr. 16) Náčrt k rozměrovým charakteristikám vibromotorů [16]	26
Obr. 17) Dolní pohled navržené pracovní desky	27
Obr. 18) a) Horní pohled na pracovní desku; b) spodní pohled na pracovní desku	28
Obr. 19) Přehled parametrů oceli značky S235JR [16]	29
Obr. 20) Vytvořená síť konečných prvků	30
Obr. 21) Spodní pohled na nastavené parametry	31
Obr. 22) Horní pohled na nastavené parametry	31
Obr. 23) Maximální průhyb konstrukce	32
Obr. 24) Maximální napětí konstrukce	33
Obr. 25) Skutečné maximální napětí konstrukce	33
Obr. 26) Pneumatický měch imi norgren pm/31021 [18]	35
Obr. 27) Parametry vzduchového měchu – model pm/31021 je v tabulce umístěn nahore [18]	35
Obr. 28) Závislost zdvihové síly měchu na tlaku vzduchu [18]	36
Obr. 29) Svarové spoje na držáku vibračního motoru – vyznačeny oranžově	37
Obr. 30) Svarové spoje v rozích konstrukce – vyznačeny oranžově	37
Obr. 31) Schéma k rovnici 11, celková délka svaru [21]	38
Obr. 32) a) Čelní spoj s oboustrannými koutovými svary (vlevo); b) uvolněná část svarového spoje [20]	38
Obr. 33) Schématický pohled navrženého rámu	40

9 SEZNAM PŘÍLOH

Název	Číslo dokumentu	Formát
Vibrační stůl - sestava	BP_TUCEK_SESTAVA_A2	A2
Držák vibromotoru	BP_TUCEK_DRZAK_A3	A3